

70 I J | 帯レクテナアレイシステムの高効率化

山本 敦士[†] 下川床 潤[†] 津留 正臣[‡] 佐々木拓郎[†] 本間幸洋[†]

[†] 三菱電機株式会社 通信機製作所 〒883/: 883 兵庫県尼崎市塚口本町 : /3/3

[‡] 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 〒469/: 723 神奈川県鎌倉市大船 7/3/3

G/o ckn< † [co co qvqC vuvuj kB edO kuwldkuj kGrgvteleEqOr

あらまし 将来の大型マイクロ波受電設備を想定し、アンテナ効率と整流効率の両方を高効率化した 70 I J | 帯 478 素子レクテナアレイシステムを開発した。衛星分散型の宇宙太陽光発電システムでは、レクテナ受電エリアの端部で 30 Y le⁴、中央部で 322~522o Y le⁴ の電力密度が想定されている。筆者らはこれまでに 70 I J | 帯 3o Y 級レクテナの開発を行い、THFE 変換効率 78% を達成した。今回、受電エリア中央部を想定した 422o Y 級レクテナアレイの試験結果を報告する。レクテナアレイシステムの高効率化には、アンテナ利得の向上、整流回路の高効率化、FE 合成最適化が必要である。アンテナ利得向上のため、3 素子当たりの利得が最大となるよう素子間隔を選定し、整流回路は 422o Y 入力時に計算値 850%、実測値 84% の THFE 変換効率を得た。レクテナアレイとしては、全直列合成した際に 580 W の FE 電力が得られることを確認し、高効率レクテナアレイシステムを実現した。

キーワード 宇宙太陽光発電、マイクロ波電力伝送、レクテナ、70 I J | 帯

F gxgnqr o gpvqh 70 I J | J ki j / Ghhekgpe { Tgevgppc Cttc { U { u ngo

Cvuvuj k [CO CO QVQ[†] Lxp Uf KO QMCY CVQMQ[†] O cucqo k VUWTW[‡] Vcmwtq UCUCMK[†] cpf
[wnkj ktq J QOOC[†]

[†] O kuwldkuj kGrgvtele Eq0Eqo o wplecvkqp U { u ngo u Egpvt. : /3/3 Vuvnxi wej kJ qo o cej k Co ci cucnk J { qi q. 883/: 883
Lcr cp

[‡] O kuwldkuj kGrgvtele Eq0Kphto cvkqp Vgej pqmi { T (F Egpvt. 7/3/3 Qhwpc. Mco cmwtc. J { qi q. 883/: 883 Lcr cp

G/o ckn< † [co co qvqC vuvuj kB edO kuwldkuj kGrgvteleEqOr

Abstract Y g j cxg f gxgnqr gf c 70 I J | / dcpf 478 / gngo gpv tgevgppc ctte { hqt rcti g uecng o letqy cxg r qy gt vcpuo kuukqp
gs wkr o gpvu0Kp vj g URUeqpegr vd { hqto cvkqp hki j v kvku cuuvo gf vj cvvj g r qy gt f gpukkgu ctg 3o Y le⁴ cvvj g ctgc gf i g cpf
322 vj 522 o Y le⁴ cv vj g egpvt ctgc qh vj g tgevgppc0 Kp hqto gt uwf { . y g j cxg f gxgnqr gf vj g 70 I J | / dcpf 3o Y / eruu
tgevgppcu y kj 78' THFE eqpxgtukqp ghhekgpe { 0 Kp vj ku r cr gt. vj g gzco kpcvqp tguwuu qh 422o Y / eruu tgevgppc ctte { u hqt
vj g egpvt ctgc qh vj g tgevgppc ctg tgr qtvgf 0 C j ki j / ghhekgpe { tgevgppc ctte { u { u ngo tgs wktgu j ki j gt cpvgppc i clp. tgevh { kpi
ektewku y kj j ki j / ghhekgpe { . cpf qr vko k cvkqp qh vj g qwr wFE eqo dlpcvqp0 Vj g f kvcepeg qh gcej r cvej cpvgppc j cu ugv hqt
o czko wo i clp0 Kp vj g tgevh { kpi ektewku. vj g THFE eqpxgtukqp ghhekgpe { ku ecrewrvgf cu 850' cv422o Y kpr wr r gt gcej
gngo gpv. cpf ku o gcuwgf cu 84' 0Kku eqphko gf vj cvvj g o czko wo FE r qy gt ku qdvclpgf qxgt 58Y eqppgevgf kp cmugt lgu0

Keyword Urceg Uqnt Rqy gt U { u ngo . O letqy cxg Rqy gt Vcpuo kuukqp. Tgevgppc. 70 I J |

1. はじめに

宇宙太陽光発電システムや無線電力伝送システム
の受電部に用いられるレクテナ装置には、高効率な
THFE 変換効率が求められる[3] [5]。一般的に、レク
テナの THFE 変換効率は入力電力に応じて増加する
傾向にあり、レクテナ装置への入力電力は中央部が最
も高く、領域端部が低い。衛星分散配置型の宇宙太陽
光発電システム[6]においては、レクテナ中央部の入力
電力は 3 素子当たり 322o Y ~ 522o Y 相当、領域端は
3o Y 相当と試算されている。筆者らはこれまでに、領
域端を想定して 70 I J | 帯の o Y 級レクテナを開発し、
3o Y 入力時に THFE 変換効率 78% を達成した[7] [8]。

本研究においては、レクテナ中央部を想定し、422o Y
入力時の整流回路単体の効率向上と、アレイ状態で最
大利得が得られるアンテナの開発を行った。また、FE
合成方法の比較を行い、レクテナアレイのシステム効
率を向上させる方針を示した。今回、478 素子レクテ
ナアレイを試作し、京都大学宇治キャンパスの
C/O GVNCD において、試験を実施した。試験時には
4232 年度に当社が納入した 307mY 級 478 素子アクティ
ブフェーズドアレイ装置[9]を用いて暗室において無
線電力伝送実験を行い、58Y 強の FE 電力が得られる
ことを確認した。

2. レクテナ装置概要

表 1 にレクテナ装置の概要を示す。使用周波数は 5.8GHz、素子数は前述の通り 256 素子とし、16 素子サブアレイを縦横 4 枚ずつの計 16 枚配置する。入力 RF 電力は 200mW/素子であり、これはレクテナアレイ全体では 51.2W の入力電力に相当する。整流回路の RF-DC 変換効率は目標 60%以上、アンテナは右旋円偏波方式を採用している。

表 1 レクテナアレイ概要

	設計値	備考
周波数	5.8GHz	
素子数	256 素子	16 素子サブアレイ ×16 枚
入力 RF 電力	200mW/素子	256 素子に 51.2W 相当
整流回路部 RF-DC 変換 効率	60%	200mW/素子 入力時
偏波方式	右旋円偏波	
素子間隔	39mm	
出力 DC 電力	30W 以上	
装置サイズ	822[H]×660[W]×486[D] (mm)	

図 1 に 16 素子サブアレイの外観図を示す。16 素子サブアレイ基板の外形は 155mm×155mm である。各整流回路にて得られた DC 電力は、整流回路面の中央部に配置された DC 集電部にて取り出される。

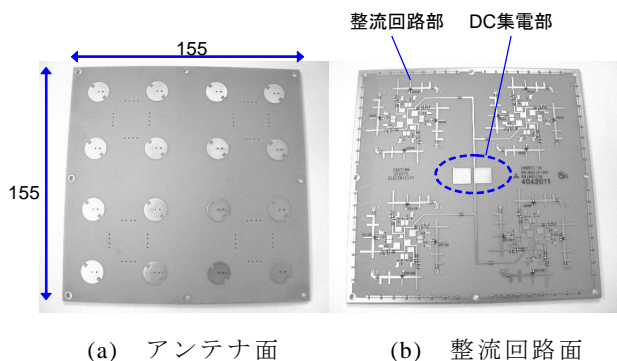


図 1 16 素子サブアレイ外観

図 2 に支持構造(金属体)を含めた 256 素子レクテナ装置のイメージ図を示す。アンテナにおける軸の定義を合わせて示す。

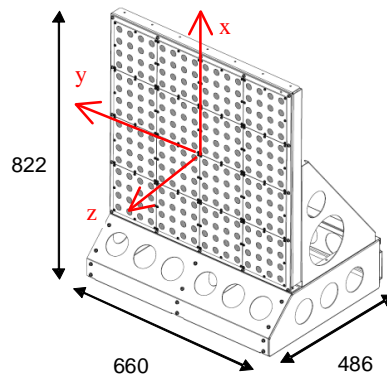


図 2 256 素子レクテナ イメージ図

3. アンテナ設計

アンテナ素子には、右旋円偏波の受信が可能な縮退分離型の円形パッチアンテナを採用した。多層基板を用いて整流回路裏面にパッチアンテナを配置し、両面はスルーホールを介して接続される。基板には、BT レジン¹($\epsilon_r=3.43$, $\tan \delta=0.0033$)を用い、アンテナ面の基板厚は 2.4mm とした。

レクテナアレイとして受電電力を最大とするためには、各アンテナ素子のアンテナ利得を極力大きくする必要がある。ここで、アンテナ素子をアレイ化した場合、アンテナ素子間隔により素子間結合が変化し、それに伴いアンテナ利得も変化する。図 3 に、アンテナ素子間隔に対するアンテナ利得の電磁界シミュレーション結果を示す。なお、図中の利得には送電アンテナの軸比を 0dB と仮定した場合の偏波損失も含まれている。図より素子間隔を 39mm(0.75λ , λ は 5.8GHz に対する自由空間波長)とした場合に素子利得の最大値 7.4dB が得られることがわかる。従って、レクテナ素子間隔は 39mm を選定した。なお、この際のアンテナ素子としての放射効率の計算値は -0.35dB である。

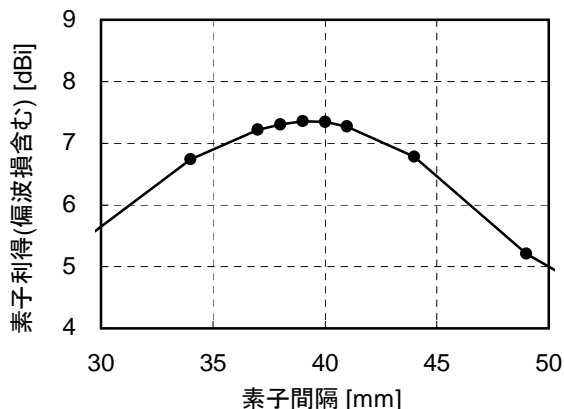


図 3 素子間隔と素子利得の関係

¹ BT レジンは三菱瓦斯化学株式会社の商標名である

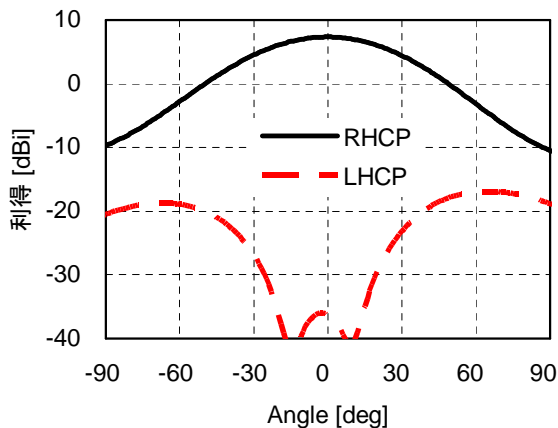


図 4 素子アンテナ放射パターン(xz 面)

4. 整流回路

整流回路はアンテナ面の裏面に配置され、表層から RF 地導体までの距離は 0.6mm である。図 5 に 1 素子分のレクテナのブロック図を示す。

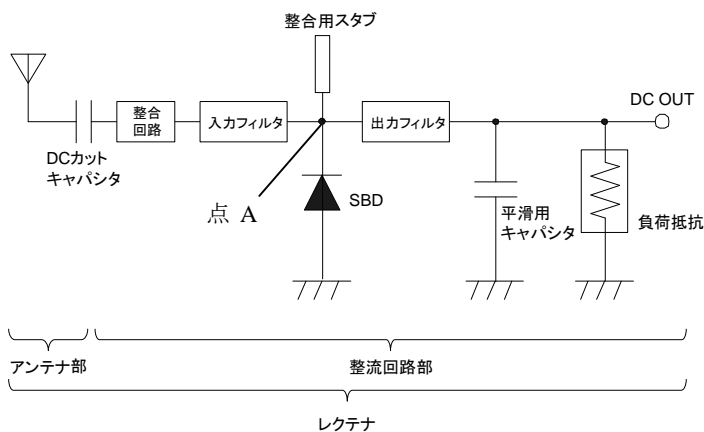


図 5 レクテナ ブロック図

高調波処理は 3 倍波まで考慮し、ショットキーバリアダイオード(以下 SBD)の入力側に 2 倍波と 3 倍波、出力側に基本波及び 2 倍波用のオープンスタブを配置した。これにより、SBD が RF 線路と接続する箇所(点 A)において、基本波及び 3 倍波でオープン、2 倍波ショートの実現している。また、点 A にオープンスタブを配置し、特に SBD のパッケージや基板のスルーホールなどによる寄生成分をキャンセルしている。点 A に整合用スタブが無い場合、誘電率が例えば高い方に 6%シフトした場合、効率は 10%低下するが、整合用スタブが有る場合の効率低下は 2%に留まるため、性能の安定化の面で非常に有用である。

多層基板を用いて片面をアンテナ面、反対面を整流回路とした本構成では、整流回路の寸法は素子間隔により制限されるため、小形化が重要となる。SBD 上の

オープンスタブを配置する回路構成では、広帯域化するために入力側で整合回路を多段にする必要が無いため、小形化にも有効である。

図 6 に RF-DC 変換効率の負荷抵抗依存性、図 7 に同効率の入力電力依存性を示す。回路シミュレータ ADS(Agilent 社)及び付加機能である 2 次元電磁界計算ツール Momentum を用いた計算の結果、200mW 入力時に、360Ω 負荷において、整流回路単体で RF-DC 変換効率 63.7%となる見込みが得られた。実測の結果、6 枚の測定結果において +23dBm 入力時に 60~62% が得られ、設計値通りであることを確認した。負荷抵抗依存性は概ね設計値と実測値は一致しているが、入力電力依存性については特に低入力電力時に差が大きい。この原因は、SBD の接合容量 C_{j0} であり、設計時に使用した値 0.7pF から 0.5pF とすることで設計値と実測値の傾向が一致することを確認した。

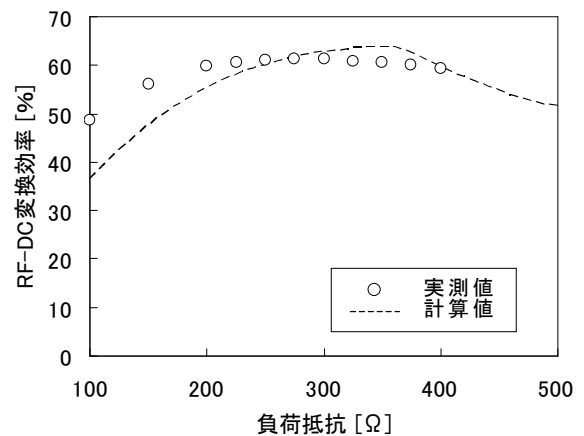


図 6 負荷抵抗依存性

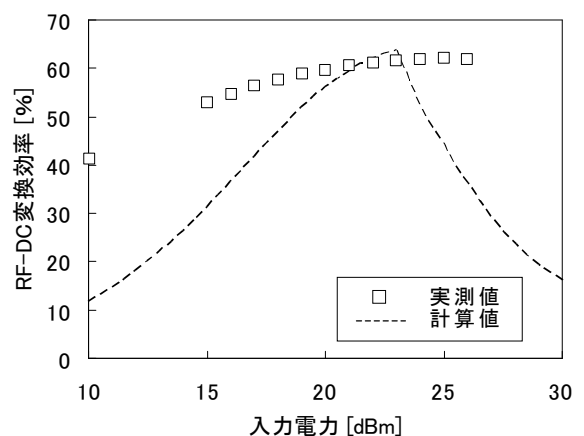


図 7 入力電力依存性

表 2 に、+23dBm 入力時の整流回路単体の再放射量を示す。SBD の非線形性により発生する高調波は、入力側に反射して空間に再放射する可能性があり、電波

法の規定に従い、抑圧する必要がある。また、再放射の抑圧は高調波の整流動作への活用を意味し、効率向上に寄与すると期待される。基本波、2倍波、3倍波の高調波抑圧量はそれぞれ設計時に-27.8dBc、-40.1dBc、-46.1dBcであり、実測では-16.6dBc、-50.1dBc、-53.2dBcが得られた。基本波の再放射レベルが高いものの、2倍波、3倍波を抑え、整流動作に有効に活用できていることから、設計の妥当性が確認された。

表 2 整流回路単体の再放射量 (+23dBm 入力)

		基本波 (5.8GHz)	2倍波 (11.6GHz)	3倍波 (17.4GHz)
再放射量 [dBc]	設計値	-27.8	-40.1	-46.1
	実測値	-16.6	-50.1	-53.2

5. レクテナ試験

A. レクテナサブアレイ

一般に、各整流回路の DC 電圧を合成する場合、個々の DC 出力を直列合成する場合と並列合成する場合が考えられる。直列合成する場合、過入力や ESD 等で 1 つのレクテナが開放モードで故障すると、全出力が得られない危険性がある。そのため、今回のように合成方法の変更が効かない同一基板内に 16 素子を配置する場合は、基板内では並列合成することが望ましい。

まず、16 枚のレクテナサブアレイの個体ばらつきを確認した。図 8 に 16 枚のサブアレイの効率 η_i のばらつき $\Delta\eta_i$ を示す。16 枚の平均値からの相対値は $\Delta\eta_i (=$

$\eta_i - \sum_{k=1}^{16} \eta_k / 16)$ と表される。サブアレイ内のレクテナ

16 個の内、1 つのレクテナが故障した場合、電力効率は約 4% (=単体効率 63% ÷ 16) 低下する可能性があるが、本測定結果、全てのレクテナが正常動作していることと、RF-DC 変換効率のばらつきの範囲がサブアレイ間で ±1% 以内に留まることを確認した。本試験における最適負荷抵抗値は 29.7 Ω であった。

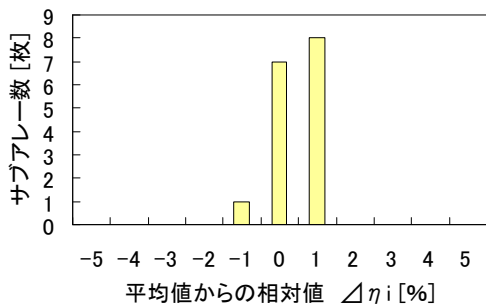
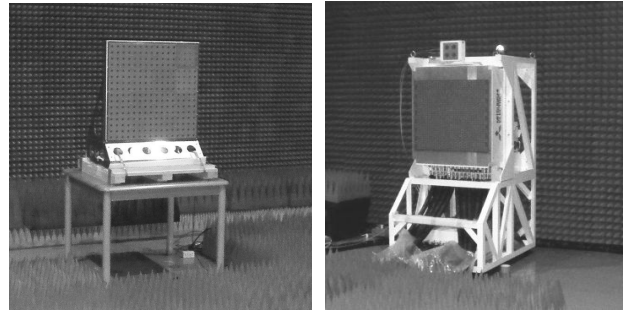


図 8 サブアレイの RF-DC 変換効率ばらつき

B. レクテナアレイ

図 9 に 256 素子レクテナアレイと送電 APAA[7]の装置外観図、図 10 に 256 素子レクテナアレイ試験系イメージ図を示す。14m 離れた 1.5kW 級送電 APAA から、5.8GHz を増幅、放射し、レクテナアレイにて受電する。



(a) 256 素子レクテナアレイ (b) 送電 APAA

図 9 装置外観図

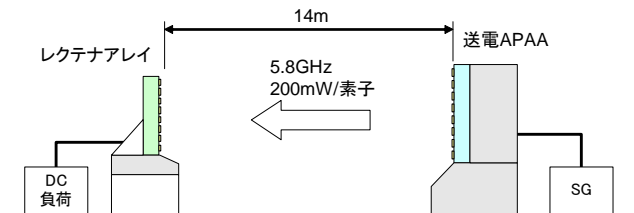


図 10 256 素子レクテナアレイ試験系イメージ図

図 11 に、送電 APAA から見たレクテナサブアレイ番号と、各サブアレイ基板の DC 電圧を示す。サブアレイ番号 No.7 及び No.8 で大きく、No.13、No.14 では低いことが分かる。本結果から、(1)DC 電圧が最大となる領域が中央部から右上にずれている、(2)DC 電圧からの換算により、サブアレイに入射する RF 電力比の最大と最小の比が 2.1dB であることが分かる。

		低	中	高	高
中	1	8.16V	8.29V	8.42V	8.47V
	5	8.42V	8.47V	8.68V	8.75V
高	9	8.16V	8.28V	8.45V	8.44V
	13	6.84V	7.22V	7.88V	8.15V

図 11 送電パネルから見たレクテナサブアレイ番号と各サブアレイ基板の DC 出力(負荷抵抗 29.7 Ω)

上記の検討結果を元に、各サブアレイの DC 出力を直列、並列、4×4 直並列に合成した場合について、RF-DC 変換効率の比較を行った。4×4 直並列合成では、隣接するサブアレイ間の DC 電圧の差が比較的小さくなるようなグループに分け（サブアレイの番号で(1~4),(5~8),(9~12),(13~16)）、このグループ内のサブアレイを並列合成、グループ間を直列合成とした。図 12 に各合成方法において得られる DC 電力の負荷抵抗依存性を示す。直列合成、並列合成、4×4 直並列合成の負荷抵抗値をそれぞれ RL_S 、 RL_P 、 RL_{SP} として、それぞれ 1/16 倍、16 倍、等倍してサブアレイ 1 枚当たりの負荷抵抗に換算している。

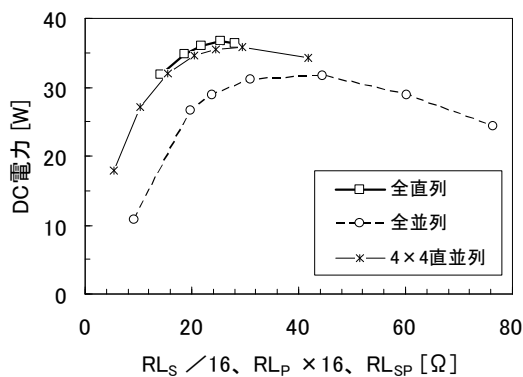


図 12 各合成方法において得られる DC 電力の負荷抵抗依存性

全直列合成では換算後の負荷抵抗 25.3Ω ($RL_S=405\Omega$) の時、最大 DC 電力 $36.8W$ 、全並列合成では 43.7Ω ($RL_P=2.73\Omega$) の時に最大 DC 電力 $31.6W$ 、4×4 直並列合成では $RL_{SP}=20\Omega$ 時に最大 DC 電力 $35.8W$ を得た。全並列合成により DC 電力が低下した理由は、サブアレイ番号 13~15 の電位が $8V$ 以下と他に対して顕著に低く、合成後の DC 電圧が低下したためである。一方、全直列合成では、図 11 に示す各サブアレイから出力される DC 電力の総和と、ほぼ同等の DC 電力が得られており、大きな劣化なく統合されている。4×4 直並列合成でグループ内のサブアレイ間の DC 電圧の差が小さく、並列合成しても電圧低下しない。このため、直列合成に対して大きな差異は生じないと考えられる。

6. さいごに

レクテナアレイシステムの高効率化には、アンテナ利得の向上、整流回路の高効率化、DC 合成最適化がある。レクテナをアレイ化した場合の素子間結合を考慮し、各素子のアンテナ利得が最大となるようアンテナ

素子間隔を 0.75λ とした。また、信頼性・入手性・取扱いの容易さを考慮し、市販のパッケージ品のショットキーバリアダイオードを用いて整流回路を構成し、RF-DC 変換効率の設計値 63.7% に対して実測値 62% を得た。また、全てのサブアレイを直列合成することで $36.8W$ の DC 電力を得、 $5.8GHz$ における高効率なレクテナアレイシステムを実現した。本試作結果で得られた知見は、同システムの更なる効率向上に向けて活用する。

7. 謝辞

本報告は、「京大生存圏研究所マイクロ波エネルギー伝送実験装置 平成 24 年度共同利用研究」の研究成果です。設備利用にあたって、京大生存圏研究所の皆様にご指導、ご助言を頂きました。深く感謝の意を表します。

文 献

- [1] P. E. Glaser, "An over view of solar power satellite option," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.40, no. 6, pp. 1230-1238, Jun. 1992.
- [2] W.C Brown, "The history of power transmission by radio waves", IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol.MTT-32, pp.1230-1242, Sep. 1984.
- [3] W. C. Brown and E. E. Eves, "Beamed microwave power transmission and its application to space," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, no. 6, pp. 1239-1250, June 1992.
- [4] I. Mikami, T. Mizuno, A. Yamamoto, H. Ikematsu, H. Satoh, K. Namura, N. Shinohara, K. Hashimoto and H. Matsumoto, "Study on SPS with satellites in formation flight and high sensitivity rectenna," ISRSSP'07, pp.153-156, 2007.
- [5] 篠原真毅, 松本紘, 山本敦士, 桶川弘勝, 水野友宏, 植松弘行, 池松寛, 三神泉, "mW 級高効率レクテナの開発," 第 7 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウムプロシーディング集, pp.105-110, 2004.
- [6] K. Nishida, Y. Taniguchi, K. Kawakami, Y. Homma, M. Miyazaki, H. Ikematsu and N. Shinohara, "5.8 GHz High Sensitivity Rectenna Array," IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission, IWPT1-3, Kyoto, Japan, May, 2011.
- [7] Y. Homma, T. Sasaki, K. Namura, F. Sameshima, T. Ishikawa, H. Sumino and N. Shinohara, "New Phased Array and Rectenna Array Systems for Microwave Power Transmission Research," IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission, IWPT3-4, Kyoto, Japan, May, 2011.